

超单元在大型复杂航天相机结构中的应用

The application of super-elements in the large and complex structures of space camera

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所;2.中国科学院研究生院) 贾海涛^{1,2} 马洪亮^{1,2} 吴清文¹ 刘宏伟¹ 刘伟¹ 陈立恒^{1,2}

JIA Hai-tao MA Hong-liang WU Qing-wen LIU Hong-wei LIU Wei CHEN Li-heng

摘要:以航天光学工程中实际的相机模型为例,重点研究了超单元在模态分析和动力学分析中的适用性。结果表明,超单元在大型复杂航天相机结构中具有良好的适用性,为实际的工程分析工作提供一种切实可行的分析方法。

关键词:航天相机;适用性;超单元;分析

中图分类号:V **文献标识码:**B

Abstract: The applicability research was done importantly for super-elements in the analysis of mode and dynamics, taking a space camera model used in the space-optics engineering for example. The analytic results of mode and dynamics in the large and complex structures of space camera show that the applicability of super-elements is good, so reasonable measures in the actual analysis-works are gained.

Key words: space camera; applicability; super-elements; analysis

引言

航天相机是运载火箭的一种主要有效载荷,工作的空间环境恶劣,所以必须对其结构的可靠性进行详细的考察,有限元仿真分析在该领域得到了广泛的应用。超单元技术作为有限元分析的一种重要手段,对于诸如航天相机这样的大型复杂结构,有着十分重要的应用价值。超单元的概念最初起源于上个世纪60年代Hurty教授提出的用部件模态综合的思想来解决复杂装配结构的动态分析问题的观点,后来Craig和Bampton完善了Hurty的思想,形成了更具工程意义的部件模态综合法。MSC.Nastran中的外部超单元技术以部件模态综合法为理论基础,使此计算方法在工程应用上得以实现。我国90年代初期此方法虽然有了相应的工程应用,但是总体研究不够深入,只适用于简单的小模型,而且计算类型较少,所以缺乏普遍性和广泛性。

本文突破了以上的研究瓶颈,研究了超单元在MSC.Nastran中做模态分析和动力学分析的应用,并且取得了满意的结果。

1 超单元的基本理论

超单元的概念在物理上体现为子结构——部分结构的有限元模型;在数学上体现为边界矩阵——从内部节点到外部或边界节点进行缩减后得到的载荷、质量、阻尼和刚度矩阵。超单元法以部件模态综合法为理论基础,对部件子结构进行单独建模,并选择若干阶固定界面主模态和约束模态作为其假设模态,进行子结构模型缩聚,然后再对缩聚后的模型进行模态综合以求解整个结构的动响应。

1.1 部件模型缩聚

部件动力学方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (1)$$

由于部件矩阵被分割成两个自由度集合:边界点自由度集

合(B集)和内部点自由度集合(O集),方程可分块为

$$\begin{bmatrix} M_{oo} & M_{ob} \\ M_{bo} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_o \\ \ddot{u}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{oo} & C_{ob} \\ C_{bo} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_o \\ \dot{u}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{oo} & K_{ob} \\ K_{bo} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_o \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_o \\ F_b \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据部件固定界面模态和约束模态构造部件模态矩阵:

1)部件固定界面模态,即在完全固定边界面上的位移条件下,部件子结构系统的主模态。固定边界模态 $\{\phi_{oo}\}$ 可由求解下式得到

$$-\omega_r^2 [M_{oo}] \{\phi_{oo}\} + [K_{oo}] \{\phi_{oo}\} = 0 \quad (3)$$

式中 ω_r 为对应主模态的特征频率。

2)约束模态,即当某个边界自由度移动一个单位值,而其他边界自由度保持固定不动所形成的静态位移。所以,对每一个边界自由度都有一个对应的约束模态。表达如下:

$$\begin{bmatrix} K_{oo} & K_{ob} \\ K_{bo} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{ob} \\ \phi_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_b \end{bmatrix} \quad (4)$$

由第一行给出

$$\begin{bmatrix} \phi_{ob} \end{bmatrix} = -[K_{oo}]^{-1} [K_{ob}] \begin{bmatrix} \phi_{bb} \end{bmatrix} \quad (5)$$

构造后的模态矩阵如下

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_{oo} & \phi_{ob} \\ 0 & I_{bb} \end{bmatrix} \quad (6)$$

得到固定界面主模态和约束模态后,进行自由度缩减,为此可在固定界面主模态中略去高阶主模态,只保留k阶低阶主模态。此时,物理坐标用缩减的模态坐标表示为

$$\begin{bmatrix} u_o \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{ok} & \phi_{ob} \\ 0 & I_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_k \\ u_b \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \gamma_k \\ u_b \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 γ 表示模态坐标。

将(7)式代入(2)式并作对称变换,得到部件子结构在模态坐标下的运动方程为

$$\bar{M}\ddot{p} + \bar{C}\dot{p} + \bar{K}p = \bar{F} \quad (8)$$

1.2 部件模态综合

得到缩减后的部件模态方程后,利用部件子结构间位移协调条件及力平衡条件,进行部件模态综合,得到整个结构系统

的运动方程。以两个部件为例,设为a、b,则部件a、b的非耦合非独立模态方程为

$$\bar{M}_2 \begin{bmatrix} \ddot{y}_a^a \\ \ddot{y}_a^b \\ \ddot{u}_a^a \\ \ddot{u}_a^b \end{bmatrix} + \bar{C}_2 \begin{bmatrix} \dot{y}_a^a \\ \dot{y}_a^b \\ \dot{u}_a^a \\ \dot{u}_a^b \end{bmatrix} + \bar{K}_2 \begin{bmatrix} y_a^a \\ y_a^b \\ u_a^a \\ u_a^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{F}_a^a \\ \bar{F}_a^b \\ \bar{F}_a^a \\ \bar{F}_a^b \end{bmatrix} \quad (9)$$

引入部件间约束方程

$$u_b^a = u_b^b \quad (10)$$

$$\bar{F}_b^a = -\bar{F}_b^b \quad (11)$$

整理得结构系统的运动方程为

$$\bar{M}_2 \ddot{\eta} + \bar{C}_2 \dot{\eta} + \bar{K}_2 \eta = \bar{F} \quad (12)$$

求解(12)式可得整个结构系统的各阶固有频率和模态,再用模态叠加法求解系统的动力学特性。

2 超单元分析

超单元法适用于处理大型复杂模型。一个模型被分成若干个部件,每个部件看作一个超单元,进行独立建模及模型缩聚,而后按一定的连结方式通过界面节点进行组合。超单元法的分析流程如图1所示。

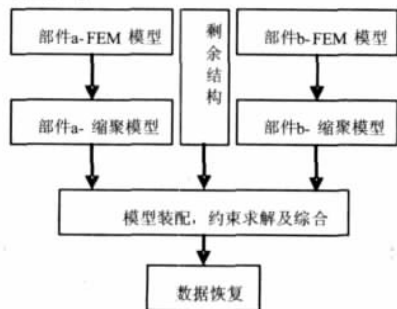


图1 超单元分析流程图

2.1 模型描述

算例采用的是实际的航天相机的有限元模型,外形尺寸为2m×1m×1m,按照所处位置和功能可以分为15个部件。有限元模型共有27270个节点,23660个单元,是一个大型复杂结构,根据部件个数共创建了15个超单元。

2.2 模态分析

该模型是按照使用超单元的个数分步骤进行模态分析的,共分为以下曲线中的6种情况,即原始模型、主镜作为超单元、主镜和卡具作为超单元、主镜、卡具和锥筒作为超单元、包括以上组件的7个超单元、全部15个超单元。

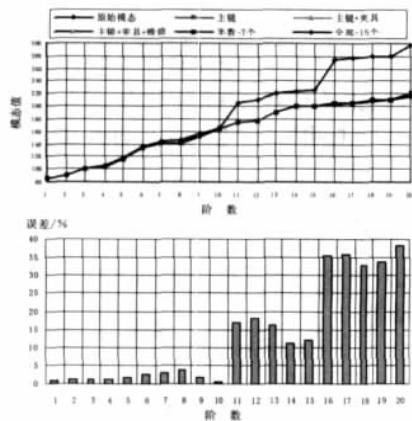


图2 模态曲线对比、模态误差及趋势

从图2可知:当只使用部分超单元时,如使用半数以下个超单元时,模态曲线吻合的都相当好,几乎没有误差,只是在第20阶的时候才稍有抬高;当使用了全部15个超单元后,其误差有了明显的增加,其前10阶均在4%之内,后10阶的误差较大,在40%之内。那么在实际的工程分析中要求的10%的误差范围内,就需要酌情考虑超单元的数量选择。

2.3 动力学分析

表1是该模型在冲击和随机振动工况下应用了超单元前后的结果对比。MSC.Nastran中的超单元技术是以模态综合法为理论基础的,因此本文进行动力学分析时均采用了模态法进行求解计算。

表1 应用超单元前后的结果对比

项 目	原始模型		超单元模型	
	计算时间	结果文件大小	计算时间	结果文件大小
随机振动	1561s	1683MB	1108s	1876MB
冲击	2220s	2457MB	1364s	2460MB

从表1中可知,在应用超单元后,计算时间各工况均有明显的节省,而误差情况如下所述:

1)对于随机振动:激励的均方根加速度(RMS)值为4.84g。响应曲线如图3所示,横纵坐标均为对数坐标,横坐标为响应频率(范围10—2000Hz),纵坐标为功率谱密度(单位为g²/Hz)。

从图中可知,原始模型的最大响应RMS值为29.9g,最大单元应力值33.8MPa。而超单元模型的最大响应RMS值为29.5g,最大单元应力值29.8MPa。误差分别为1.33%,11.8%。从响应曲线图3可知,响应在低频范围内曲线吻合的很好,高频范围有一定的偏差,但是两者的均方根值却很接近,由此说明超单元得到的结果具有很好的可信度。而单元应力误差稍大的原因在于计算时频率份数不同,但仍满足工程应用中误差10%的要求。

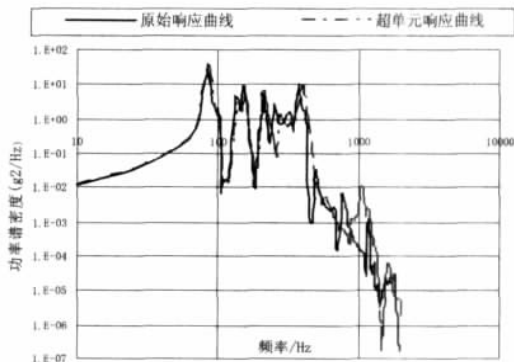


图3 同一节点在随机振动下的功率谱响应

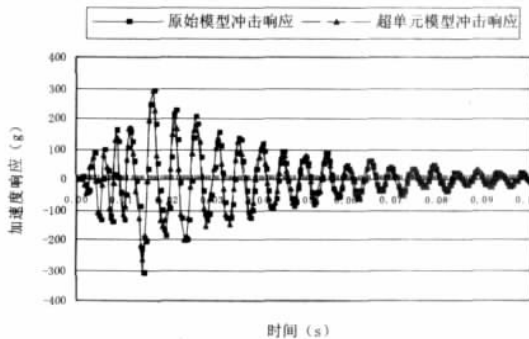


图4 同一节点在冲击下响应对比

2)对于冲击激励:从图4中可知,原始模型的最大响应时刻在0.0145s处,最大响应值为-308g;最大节点应力为301MPa,最大单元应力为298MPa。超单元模型的最大响应时刻在0.0145s处,最大的响应值为-264g;最大节点应力为320MPa,最大单元应力为294MPa。

以上数据应用超单元后的误差分别为14.3%、6.3%和1.3%。对于工程实际而言,以上的误差基本可以接受。

冲击响应误差较大的原因分析:分析时选取的时间步长为0.0005s,而在0.0145s处的响应峰又太陡,很可能在此时刻的前后缺少一个有价值的特征解。而当我们预减小步长进行分析时,对于原始模型计算机已无法求解,因此导致了上述无法避免的误差,但是当考察0.0165s处的峰值时,原始模型的响应值为291g,超单元模型的响应值为288g,他们的误差仅为1%,差别很小。

在上述的动力学的分析结果中,还可以发现:对于剩余结构而言,其结果是没有误差的。这也就是说,如果某个构件需要特别关注,那么就将其作为剩余结构,而其它的构件自然划分为超单元即可,这样便能得到更加理想的结果。

3 结论

通过超单元在大型复杂航天相机结构的模态分析和动力学分析,得到如下的结论:

1)从响应结果来看,超单元在模态分析和动力学分析中,用时短、精度高、误差小,实际的工程适用性良好;

2)在创建了超单元的结构中,各种响应均存在一定的误差,但误差均在实际工程项目可以接受的范围之内,而对于剩余结构则没有误差;

3)对于动力学分析,在实际工程给定的条件下,使用相同的频率份数和时间步长,超单元拥有着解决大型复杂模型的能力。

本文作者的创新点:从工程实践的角度讨论了超单元在航天相机大型复杂结构中的应用,探索性的将其应用到随机振动和冲击振动分析中,结果良好。

参考文献

- [1]杨劲松等.基于子结构的航天相机冲击动力学仿真[J].计算机仿真,2003,20(8):33-35.
- [2]沈满德,陈良益等.基于优化设计的单元尺寸确定方法[J].微计算机信息,2007,12-1:239-241.
- [3]赵光会等.航天器结构动态响应分析的外部超单元技术[J].航天器工程,2001,10(2):27-33.
- [4]刘巨等.用子结构模态综合法求解光学反射镜组件结构动响应[J].光学技术,2005,31(3):338-343.
- [5]The MacNeal-Schwendler Corp. MSC/Nastran Superelement Users' Guide (V70.5) [R]. Los Angeles, Ca: The MacNeal-Schwendler Corp., 1999.
- [6]方明霞,冯奇.固定界面动态子结构方法研究车内噪声问题[J].力学季刊,2005,26(4):572-579.
- [7]张永昌. MSC.Nastran 有限元分析理论基础与应用[M]. 北京:科学出版社,2004:367-371.

作者简介:贾海涛(1982—),男(汉族),河北唐山人,在读硕士,主要研究方向是有限元仿真分析与模型修正;吴清文(1968—),男(汉族),四川简阳人,博士,研究员,主要研究方向是光学精密仪器的CAD/CAM/CAE,现从事空间光学热控技术研究。

Biography: JIA Hai-tao (birth 1982-), male (Han), Hebei Province, the postgraduate master of Changchun Institute of Op-

tics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, the main direction of research is FEA and FEA model updating.
(130033 长春 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 贾海涛 马洪亮 吴清文 刘宏伟 刘伟 陈立恒
(100039 北京 中国科学院研究生院) 贾海涛 马洪亮 陈立恒
通讯地址:(130033 长春 长春市经济技术开发区营口路20号D座316室) 贾海涛

(收稿日期:2009.07.15)(修稿日期:2009.08.15)

(上接第36页)

5 结束语

Rainbow IKey 以其日益完善的保密储存功能得到了用户的认可,在产生票据号的过程中,IKey 发挥了其不可替代的安全作用,无论是票据的产生和票据的验证,都离不开 IKey。在日益纷繁复杂的票据交易中,IKey 无疑给交易的安全性带来了更多的保障。

创新点:本文的创新点在于使用硬件加密处理器产生密钥并保存和管理密钥,在很大程度上提高了票据使用的安全性。

经济效益:本文设计的产生商业票据的方法已经应用于本市某大型连锁超市的票据制作系统,已经为他们带来了上千万的经济效益。

参考文献

- [1]杜昌钰.MD5 算法的过程分析及其 C# 实现. 通信技术,2008,08,41.
- [2]Rainbow iKey 1000 开发商指南,Rainbow Technologies.
- [3]Ikey 1000 API 参考指南.
- [4]Rivest R. The MD5 Message-Digest Algorithm. RFC 1321, April 1992.
- [5]H. Karen Lu and Asad Ali, Communication Security between a Computer and a Hardware Token, Technology and Innovation, Gemalto, Inc. Arboretum Plaza II, 9442 Capital of Texas Hwy, Austin, TX, USA.
- [6]Ali, A.M. and Lu, H.K., Securing the Internet through Plug-n-Play Smart Cards, The 2007 International Conference on Internet Computing, Las Vegas, Nevada, June 25-28, 2007.
- [7]段青玲,杨仁刚,李辉. MD5 算法在电话语音系统软件保护中的应用. 微计算机信息,2007,8-3:32-34.
- [8]ISO/IEC 7816-4: Identification Cards - Integrated Circuit Cards, Part 4: Organization, Security, and Commands for Interchange.

作者简介:谢琦(1963—),男,郑州大学信息工程学院副教授,硕士生导师,主要研究方向:计算机网络安全,嵌入式开发等;杨文娜(1983—),女,郑州大学硕士研究生,主要研究方向:消息级加密技术。

Biography: XIE Qi (1963-), male, College of Information Engineering, Zheng Zhou University, associate professor, major in web security and embedded development.

(450001 河南郑州 郑州大学信息工程学院) 谢琦 杨文娜
(College of Information Engineering, Zheng Zhou University, Zheng Zhou 450001, China) XIE Qi YANG Wen-na
通讯地址:(450001 河南省郑州市 郑州大学新校区信息工程学院 8106 信箱) 谢琦

(收稿日期:2009.07.15)(修稿日期:2009.08.15)